

立体トラスの模型実験とその応力解析

室蘭工業大学工学部 正員 ○中村作太郎
 室蘭工業大学工学部 正員 松岡 健一
 室蘭工業大学工学部 田中 功
 日本水道コンサル.(株) 正員 土居 博史

1. 緒 言

トラス橋は立体構造であり、その節点も最近では溶接または高張力ボルト接合となり、従来かう用いられてい
 る慣用の平面ピン節トラスの理論解析のみにより計算することはきわめて不合理である。

立体トラスの理論解析については、諸外国および我国においてすでに多くの学者により研究が行われてきてお
 り、その発達傾向は最近における電子計算機の進歩に伴いその利用に便利な方向に進みつつあり、マトリックス
 法、漸化変形法、Kanai 拡張法などが続々登場しつつある。

著者等は支間 3.75

m の立体溶接トラスの
 模型(図-1参照)を
 室蘭川村造船所 K、K
 に依頼して製作し、静
 的載荷試験によりその
 弾性領域内における応
 力特性を吟味すると
 ともに、塑性領域に入
 ったからの力学的挙動と
 その破壊現象をも観測
 ・追求した。

また、実験値と比較

吟味する目的で、平面ピン節トラス・平面剛節トラス・立体ピン節トラス・立体剛節トラスそれぞれの理論によ
 る応力解析を行ない好結果を収めたが、特に平面剛節トラス・立体ピン節トラス・立体剛節トラスに対しては、
 剛性法によるマトリックス解法を適用し電子計算機 FACOM 230-60(北大電算機センター)、FACOM 231(室蘭工業大学)も
 酷使したことを付記する。

2. 模 型 実 験

図-1 に示した立体溶接トラスの模型を室蘭川村造船所 K、K に依頼して製作し、室蘭工業大学の共同施設で
 ある構造物疲労試験室に運搬し、島津製作所製サーボパルサー EHF 30 型の構造物疲労試験機(両振り型、動的
 荷重の最大能力 30 t、静的荷重の最大能力 40 t)、Load cell, LC-10TA (Capacity 10 t) 1個, Jack
 , MH-5 (Capacity 5 t) 1個, Strain Meter (Indicator): SM-6 K 3台, SM-60AT 2台, SM-60
 B 1台, Switching and Balancing Box SS-24R 9台, Dial gage 6~10 個, Strain gage: KC-10
 -A1-11 (Gage length 10 mm, Resistance $120 \pm 0.3 \Omega$, Gage factor $2.05 \pm 1.0 \%$, Thermal output $\pm 1.8 \mu E/^{\circ}C$, Gage
 cement セメダイン 3000 ゴールド), KC-10-A1-11 (Gage length 10 mm, Resistance $120 \pm 0.3 \Omega$,
 Gage factor $2.08 \pm 1.0 \%$, Thermal output $\pm 1.8 \mu E/^{\circ}C$, Gage cement セメダイン 3000 ゴールド), KL-
 10A-4 (Gage length 10 mm, Resistance $120 \pm 0.3 \Omega$, Gage factor $2.02 \pm 1.0 \%$, Gage cement セメダイン 3000

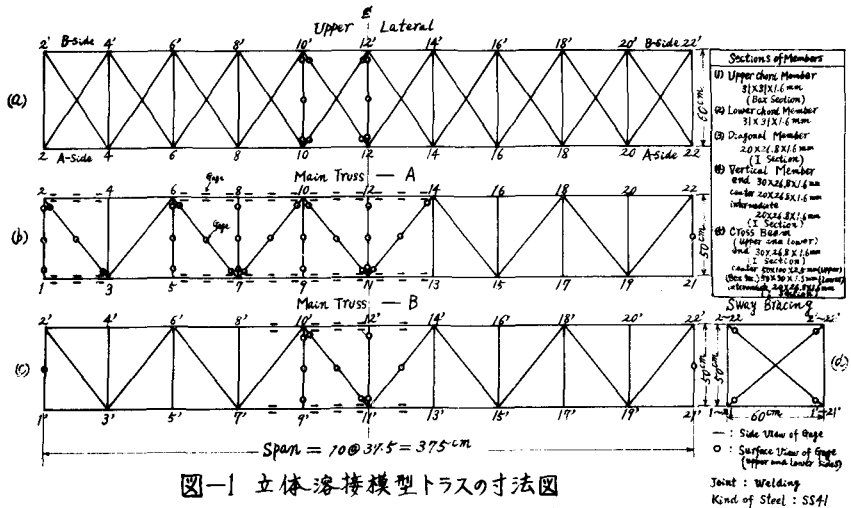


図-1 立体溶接模型トラスの寸法図

ゴールド), Gage 端子 TPI (Cement セメダイン 3000 ゴールド), X-Y Recorder: D-73 1台, D-72 1台, 多ペン Recorder B-54-34 1台, Visigraph FR-301 2台, Power unit DPM-10H 3台, Dynamic strain amplifier 3台, Strain gage KLM-6-A9 16枚 などを使用して, 弾性限度以内および塑性領域に入ってからの実験を行なった。以下実験方法について述べれば次の通りである。

(1) 実験順序

実験は4段階に分けて行なった。すなわち, 第1段階として主構A側への偏心載荷による弾性領域内での実験, 第2段階として主構B側への偏心載荷による弾性領域内での実験, 第3段階として中央載荷による弾性領域内での実験, 第4段階として中央載荷による破壊まで継続する塑性領域での実験に分けることが出来る。

(2) 支 承 部

両支点とも疲労試験機付属の支承部(半円形状をなしているもの)を使用したため, ローラー支承の状態とみられる。また, 支承部と模型との間には, 模型のなじみをよくするため, 適宜鋼片を挿入した。

(3) 載 荷 方 法

載荷荷重はすべて集中荷重となるようにし, 弾性領域内における実験では, 構造物疲労試験機の載荷装置が偶然不調のため, Capacity 10t のロードセルと Capacity 5t の自動油圧ジャッキを用いて載荷した。この場合インジケーターによりロードセルからのひずみを読みとり, それから換算して載荷量をスケッチする方法をとった。また, 破壊まで継続する塑性領域での実験では, 構造物疲労試験機付属の載荷装置が復調したため, これを用いて載荷したが, 集中荷重のクツシヨンとして, $120\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ の鋼板を用いた。

なお, 本実験における偏心載荷とは, 模型の軸方向中心線より 66 mm (支承上で模型を移動出来る最大量) 離れた点に載荷することを用いる。

(4) 弾性領域内における実験

載荷方法のところで述べたように, 自動油圧ジャッキを用いて載荷し, その最大載荷量 $2,000\text{ kg}$ を限度として測定した。測定には5台のインジケーターと9台のスイッチボックスを使用し, インジケーター1台につきスイッチボックス2台を繋ぎ, 測定者と記録者がお互いに連絡し合つて実験能率をあげた。

また, 残留応力および変形は10分経過後に測定し, 比例限度の推定には, 素材試験から得た弾性係数 $E = 2.085 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$, 降伏応力 $\sigma_y = 2,663.3\text{ kg/cm}^2$ のデータに基づいて, $\epsilon_y = \sigma_y / E = 1.2774 \times 10^{-6}$ とし, 結局すべての部材のひずみ量が 900×10^{-6} 以内であるような荷重限度を比例限度としての範囲と定めた。

(5) 素 材 試 験

本実験用のトラス模型と同質のテストピース5個について, アムスラー型試験機(最大荷重能力100t)のほか, Strain meter SM-6 K 2台と Strain gage KC-10-A1-11 (Gage factor $2.08 \pm 1\%$, Resistance $120 \pm 0.3\Omega$, Cement CC-15A)を用いて, 降伏応力 $\sigma_y = 2,663.25\text{ kg/cm}^2$, 引張強さ $\sigma_B = 3,498.40\text{ kg/cm}^2$, 弾性係数 $E = 2.085 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$, ポアソン比 $\nu = 0.280$, セン断弾性係数 $G = 0.814 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$, 体積弾性率 $K = 1.580 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$ などの結果を得た。

これらの値は土体トラス模型の本実験ならびにその処理を行なうに当り, 出来るだけ利用する方針をとった。

(6) 塑性領域における破壊までの実験

破壊の最初に起る部材を弾性領域内で行なった実験と理論計算の結果から推定し, 上弦材10-12または10'-12'と想定し, 主構Aの上弦材10-12部材に超大ひずみ測定用のゲージ KLM-6-49を貼付し, DPM-E型抵抗線動的歪測定器によりそのひずみを測定した。最終破壊荷重を理論計算より8tと想定し, 初め2tまでの載荷測定を行なった後, 機器の調整を行ない, 再び破壊実験を継続した。

まず最初に, 主構Aの上弦材10-12の節点10付近の下側に貼ったゲージのひずみが圧縮から急に引張に変わり, 続いて上側に貼ったゲージも引張に変わり, 遂に測定不可能となり予想した通りの破壊が載荷点付近の中央上弦材

に起つたがその荷重の大きさは理論値をかなり下廻る 6.0 もであつた。

次に、荷重を 3 もまで追加して載荷すると、斜材 10-11 が節点 11 付近で変形し、次いで主構 B の下弦材 9'-11' が節点 11 付近で変形し、それから主構 A の下弦材 9-10 が節点 11 付近でかなりの変形を示し注目を引いた。

その後、除荷すると、主構 A の斜材 7-10 が節点付近寄り、部材長の 1/3 付近で変形を起した。

3. 立体トラスの理論解析

立体トラスの静的解析法の一つとして剛性法が用いられることはよく知られているが、その中の直接剛性法を適用する。

(1) 直接剛性法

$\bar{S}_{ij}$: 局所座標系の部材要素 $i-j$ の部材力, $(S_{ij})_j$: 局所座標系の節点 j の断面力, $(S_{ij})_i$: 局所座標系の節点 i の断面力, $\bar{U}_{ij}$: 局所座標系の変位量, U_i : 局所座標系の節点 i の変位量, U_j : 局所座標系の節点 j の変位量, K_{ij} : 局所座標系の部材要素 $i-j$ の剛性マトリックス, T_{ij} : 座標変換マトリックス, S_{ij} : 基準座標系の部材要素 $i-j$ の部材力, $(S_{ij})_j$: 基準座標系の節点 j の部材力, U_i : 基準座標系の節点 i の変位量, U_j : 基準座標系の節点 j の変位量, K_{ij} : 基準座標系の部材要素 $i-j$ の剛性マトリックス, P : 構造物全体の外力ベクトル, K : 構造物全体の剛性マトリックス, U : 構造物全体の変位ベクトルと記号を定め、図-2 のように、部材要素方向 $i-j$ の軸方向 x とこれに直交な二方向 y, z とする局所座標系 (x, y, z) を考え、この局所座標系の部材力 $\bar{S}_{ij}$ を次のように定義する。

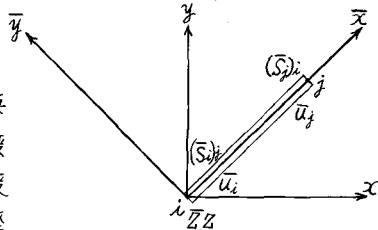


図-2 局所座標系

$$\bar{S}_{ij} = \begin{Bmatrix} (S_{ij})_j \\ (S_{ij})_i \end{Bmatrix} \quad (1) \quad \text{変位量 } \bar{U}_{ij} \text{ は } \bar{U}_{ij} = \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$\bar{S}_{ij}$ と $\bar{U}_{ij}$ との関係は、 $\bar{S}_{ij} = K_{ij} \bar{U}_{ij}$ (3) ここで、 $K_{ij} = \begin{Bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{Bmatrix}$ (4) と表わされ、 K_{ij} は部材要素 $i-j$ の局所座標系に関する剛性マトリックスとよばれるものである。

次に、基準座標系 (x, y, z) を考え、局所座標系となす角度の方向余弦を用いて、 $\bar{S}_{ij}$, $\bar{U}_{ij}$ を基準座標系の部材力 S_{ij} , 変位 U_{ij} に変換すると、 $\bar{S}_{ij} = T_{ij} S_{ij}$, $\bar{U}_{ij} = T_{ij} U_{ij}$ (5) と表わされ、 T_{ij} は座標変換マトリックスと呼ばれるものである。(5)式を(3)式に代入すると、 $T_{ij} S_{ij} = K_{ij} T_{ij} U_{ij}$ (6)

(6)式は $S_{ij} = T_{ij}^{-1} K_{ij} T_{ij} U_{ij}$ となり、 $T_{ij}^{-1} = T_{ij}^T$ により、 $S_{ij} = T_{ij}^T K_{ij} T_{ij} U_{ij}$ となる。

いま、 $K_{ij} = T_{ij}^T K_{ij} T_{ij}$ (7) とおくと、 $S_{ij} = K_{ij} U_{ij}$ (8) ここで、 $\begin{Bmatrix} (S_{ij})_j \\ (S_{ij})_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix}$

K_{ij} は部材要素 $i-j$ の基準座標系に関する剛性マトリックスとよばれるものである。

次に、図-2 に示す節点 i に集合する部材要素を $i-j$, $i-k$, $i-l$, $i-m$ とすると、点 i における部材力 $(S_{ij})_i$, $(S_{ik})_i$, $(S_{il})_i$, $(S_{im})_i$ は、(8)式から $(S_{ij})_i = (K_{ii})_i U_i + K_{ij} U_j$, $(S_{ik})_i = (K_{ii})_i U_i + K_{ik} U_k$, $(S_{il})_i = (K_{ii})_i U_i + K_{il} U_l$, $(S_{im})_i = (K_{ii})_i U_i + K_{im} U_m$ (9)

いま、図-3 の i 点において、釣合式を立てると、

$$P_i = (S_{ij})_i + (S_{ik})_i + (S_{il})_i + (S_{im})_i \quad (10)$$

(10)式に(9)式を代入すれば、 $P_i = (\sum K_{ii}) U_i + K_{ij} U_j + K_{ik} U_k + K_{il} U_l + K_{im} U_m$ (11)

(11)式は構造物の全節点において成り立ち、 $P = KU$ (12)

図-3 節点 i における部材力

ここに、 K は構造物全体に関する剛性マトリックスである。(12)式は、 $U = K^{-1} P$ (13) 故に、構造物全体の各節点変位 U が求まる。次に、部材要素 $i-j$ の節点変位 (U_i, U_j) , (8), (5)式に代入すると、 $\bar{S}_{ij} = T_{ij} K_{ij} U_{ij}$ (14) となり、部材要素 $i-j$ の部材力 $\bar{S}_{ij}$ が求まる。

次に、上式中の部材要素 $i-j$ の剛性マトリックスを立体ピン節トラス、立体剛節トラスについて表わす。

(2) 立体ピン節トラスの剛性マトリックス

図-4において, $\gamma_x = \cos \theta_{xx}$, $\gamma_y = \cos \theta_{yx}$, $\gamma_z = \cos \theta_{zx}$
 θ_{xx} , θ_{yx} , θ_{zx} はそれぞれ, $\bar{x}$ 軸と x 軸, y 軸, z 軸とのなす角度を表わす。剛性マトリックス K_{ij} は次の通りである。

$$K_{ij} = \frac{EA_{ij}}{l_{ij}} \begin{bmatrix} \gamma_x^2 & \gamma_x \gamma_y & \gamma_x \gamma_z & -\gamma_x^2 & -\gamma_x \gamma_y & -\gamma_x \gamma_z \\ \gamma_y^2 & \gamma_z \gamma_y & -\gamma_z \gamma_y & -\gamma_y^2 & -\gamma_z \gamma_y & -\gamma_z \gamma_y \\ \gamma_z^2 & -\gamma_x \gamma_z & -\gamma_y \gamma_z & -\gamma_z^2 & \gamma_x \gamma_z & \gamma_y \gamma_z \\ \text{SYM.} & & & & & \\ \gamma_x^2 & \gamma_x \gamma_y & \gamma_x \gamma_z & -\gamma_x^2 & -\gamma_x \gamma_y & -\gamma_x \gamma_z \\ \gamma_y^2 & \gamma_z \gamma_y & -\gamma_z \gamma_y & -\gamma_y^2 & -\gamma_z \gamma_y & -\gamma_z \gamma_y \\ \gamma_z^2 & -\gamma_x \gamma_z & -\gamma_y \gamma_z & -\gamma_z^2 & \gamma_x \gamma_z & \gamma_y \gamma_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

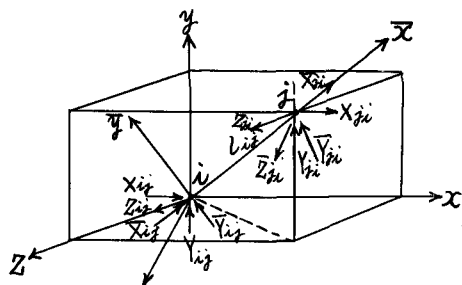


図-4 立体ピン節トラスの座標

(3) 立体剛節トラスの剛性マトリックス

図-5において, $\gamma_{xx} = \cos \theta_{xx}$, $\gamma_{yx} = \cos \theta_{yx}$, $\gamma_{zx} = \cos \theta_{zx}$,
 $\gamma_{xy} = \cos \theta_{xy}$, $\gamma_{yy} = \cos \theta_{yy}$, $\gamma_{zy} = \cos \theta_{zy}$,
 $\gamma_{xz} = \cos \theta_{xz}$, $\gamma_{yz} = \cos \theta_{yz}$, $\gamma_{zz} = \cos \theta_{zz}$
 ここで, θ_{xx} , θ_{yx} , θ_{zx} : x , y , z 軸と $\bar{x}$ 軸とのなす角度,
 θ_{xy} , θ_{yy} , θ_{zy} : x , y , z 軸と $\bar{y}$ 軸とのなす角度, θ_{xz} ,
 θ_{yz} , θ_{zz} : x , y , z 軸と $\bar{z}$ 軸とのなす角度。

座標変換マトリックス T_{ij} は,

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} t_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & t_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & t_{ij} \end{bmatrix}$$

ここに,

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} \gamma_{xx} & \gamma_{yx} & \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} & \gamma_{yy} & \gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \gamma_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{である。}$$

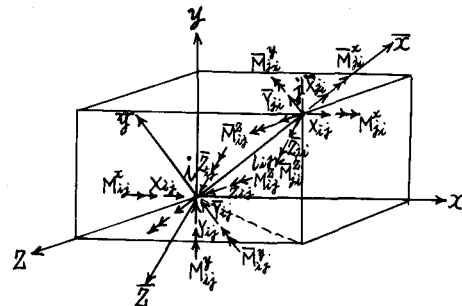


図-5 立体剛節トラスの座標

故に, 基準座標系に対する要素の剛性マトリックスは, $K_{ij} = T_{ij}^T \bar{K}_{ij} T_{ij}$ により算定される。

局部座標系に対する要素の剛性マトリックス $\bar{K}_{ij}$ を示せば, 次の通りである。

$$\bar{K}_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{EA_{ij}}{l_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA_{ij}}{l_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_y}{l_{ij}^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l_{ij}^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI_z}{l_{ij}^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_z}{l_{ij}^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l_{ij}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{l_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_y}{l_{ij}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l_{ij}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA_{ij}}{l_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l_{ij}^3} & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l_{ij}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{l_{ij}^3} & 0 & -\frac{6EI_z}{l_{ij}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l_{ij}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{l_{ij}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l_{ij}} \end{bmatrix}$$

S Y M.

(16)式において, EI_y , EI_z : 部材要素 $i-j$ の $\bar{x}\bar{y}$ 面内, $\bar{x}\bar{z}$ 面内の曲げ剛性, GJ : 部材要素 $i-j$ の捻り剛性, EA_{ij} : 部材要素 $i-j$ の軸剛性, l_{ij} , A_{ij} : 部材要素 $i-j$ の部材長, 断面積。

(16)

ここで, 座標変換マトリックス T_{ij} のサブマトリックス t_{ij} の算定法は, 図-5において, i, j 節座標を $i(0, 0, 0)$, $j(X, Y, Z)$ とすると, 次の通り示される。

$$t_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{X}{l} & \frac{Y}{l} & \frac{Z}{l} \\ -\frac{Y}{l} & \frac{X}{l} & 0 \\ -\frac{XZ}{ll'} & -\frac{YZ}{ll'} & \frac{l'}{l} \end{bmatrix} \quad (17)$$

また, 部材要素 $i-j$ が Y 軸と平行の場合は, 次のようになる。

$$t_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

(4) 数値計算

平面ピン節トラスでは従来から用いられている節点法に基づく手計算, 平面剛節トラス・立体ピン節トラス・立体剛節トラスには直接剛節法に基づく電子計算機利用のマトリックス解法を用いた。電子計算機には, 北大電算機センターのFACOM 230-60と室蘭工業大学のFACOM 231を使用し, 好結果を収めた。

図-6は立体剛節トラスの任意部材における力の釣り合いを示した図であり, 1, 2, 3および7, 8, 9は軸方向力, 4, 5, 6および10, 11, 12は軸の廻りのモーメントを示している。

数値計算をするに当り, 図-6を参照しA主構では節点の x, y, z , B主構では節点の x', y', z' をトラスにおける任意部材の両端として取り扱えばよい。

4. 研究成果²⁾

表-1 立体剛節トラスの上弦材の節点変位(mm)

主 構 A			主 構 B		
節 点	X方向変位	Y方向変位	節 点	X方向変位	Y方向変位
2	-0.89114	0.00562	2'	-0.89250	-0.00370
4	-0.85607	0.00785	4'	-0.85769	-0.00190
6	-0.82001	0.01570	6'	-0.82152	-0.00629
8	-0.71367	0.02223	8'	-0.71534	-0.00999
10	-0.60529	0.03215	10'	-0.60730	-0.01641
12	-0.43221	0.01652	12'	-0.43381	-0.01268
14	-0.25903	0.03981	14'	-0.25877	-0.01098
16	-0.15268	0.02875	16'	-0.14692	-0.00383
18	-0.04660	0.01948	18'	-0.03932	-0.00264
20	-0.01052	0.00857	20'	-0.00344	-0.00111
22	0.02427	0.00306	22'	0.03349	-0.00619

表-3 立体剛節トラスの上弦材の節点回転角
($\theta_x, \theta_y, \theta_z: \times 10^{-2}$ ラジアン)

主 構 A			主 構 B		
節 点	X軸回転角	Y軸回転角	節 点	X軸回転角	Y軸回転角
2	-0.00091	0.00062	2'	0.00065	0.00011
4	-0.00355	0.00124	4'	0.00161	-0.00023
6	-0.00571	0.00218	6'	0.00143	-0.00104
8	-0.00770	0.00246	8'	0.00204	-0.00269
10	-0.00442	-0.00026	10'	0.00008	0.00508
12	0.00134	0.00018	12'	0.00180	0.00019
14	-0.00184	0.00319	14'	0.00286	-0.00379
16	-0.00503	-0.00379	16'	0.00473	0.00220
18	-0.00333	-0.00215	18'	0.00335	0.00020
20	-0.00199	-0.00210	20'	0.00271	-0.00047
22	-0.00026	-0.00176	22'	0.00160	-0.00131

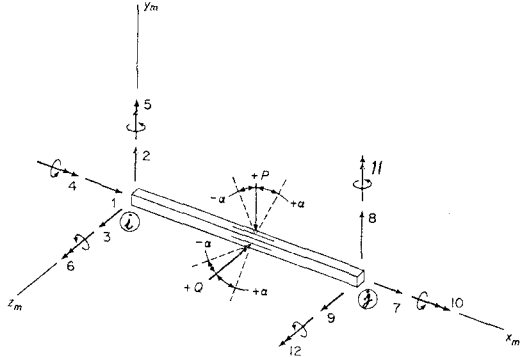


図-6 立体剛節トラスの任意部材の力の釣り合い

表-2 立体剛節トラスの下弦材の節点変位(mm)

主 構 A			主 構 B		
節 点	X方向変位	Y方向変位	節 点	X方向変位	Y方向変位
1	0	0	1'	0	0
3	-0.00192	-0.00801	3'	0.00082	0.00300
5	-0.00410	-0.01736	5'	-0.06839	0.00469
7	-0.14029	-0.02902	7'	-0.13947	0.00564
9	-0.29155	-0.03654	9'	-0.28059	-0.00132
11	-0.43950	0.03053	11'	-0.42633	0.03160
13	-0.58076	-0.00510	13'	-0.56701	0.04485
15	-0.72156	-0.00087	15'	-0.71401	0.03146
17	-0.79386	-0.00105	17'	-0.78674	0.02093
19	-0.86468	-0.00092	19'	-0.85889	0.01044
21	-0.86537	0	21'	-0.85706	0

表-4 立体剛節トラスの下弦材の節点回転角
($\theta_x, \theta_y, \theta_z: \times 10^{-2}$ ラジアン)

主 構 A			主 構 B		
節 点	X軸回転角	Y軸回転角	節 点	X軸回転角	Y軸回転角
1	0.00281	-0.00240	1'	-0.00307	0.00206
3	-0.00407	-0.00150	3'	0.00192	-0.00049
5	-0.00578	-0.00302	5'	0.00119	0.00235
7	-0.00867	-0.00490	7'	0.00261	-0.00395
9	-0.00661	0.01165	9'	0.00133	0.00825
11	0.00117	-0.00154	11'	0.00176	-0.0111
13	-0.00379	-0.00539	13'	0.00453	0.00106
15	-0.00574	0.00126	15'	0.00531	-0.00367
17	-0.00445	0.00066	17'	0.00358	-0.00342
19	-0.00387	-0.00060	19'	0.00320	-0.00183
21	0.00267	0.00118	21'	-0.00318	-0.00330

表-5 主構の上弦材応力 ($P_{max}=10t$, 中央載荷)

種 別	A, 10-12		A, 12-14		B, 10'-12'	
	節点10	節点12	節点12	節点14	節点10'	節点12'
実験値	σ_{T1}	-1207.54	-1117.71	-1150.39		
	σ_{T2}	11.13	-400.76	-437.50	47.07	50.80
理論値	$\sigma_{T1}/\sigma_{T2}(\%)$	0.92	33.20	37.14	4.33	4.42
	σ_{T1}/σ_{T2}	-1045.00	-1045.00	-1045.00	-1045.00	-1045.00
平面剛節トラス	σ_{T1}/σ_{T2}	1.16	1.07	1.10		
	σ_{T1}	-980.99	-976.25	-995.54		
立体ピン節トラス	σ_{T1}/σ_{T2}	1.23	1.14	1.16		
	σ_{T1}	-1025.64	-1025.64	-1026.20		
平面剛節トラス	σ_{K1}	132.85	-375.32	-378.36	145.37	110.67
	σ_{K2}	12.95	38.54	38.84	14.14	10.78
立体ピン節トラス	$\sigma_{K1}/\sigma_{K2}(\%)$	12.95	38.54	38.84	14.14	10.78
	σ_{K1}/σ_{K2}	1.18	1.09	1.12		
平面剛節トラス	σ_{K1}	-969.67	-965.05	-983.44		
	σ_{K2}	78.87	-324.88	-327.66	77.24	108.61
立体ピン節トラス	$\sigma_{K1}/\sigma_{K2}(\%)$	9.99	33.50	34.16	10.28	11.04
	σ_{K1}/σ_{K2}	1.25	1.16	1.17		

(注) $\sigma_{T1}, \sigma_{T2}, \sigma_{K1}, \sigma_{K2}$: 1次応力, $\sigma_{T2}, \sigma_{K2}, \sigma_{K2}$: 2次応力表-6 主構の下弦材応力 ($P_{max}=10t$, 中央載荷)

種 別	A, 9-11		A, 11-13		B, 11'-13'	
	節点9	節点11	節点11	節点13	節点11'	節点13'
実験値	σ_{T1}	881.64	836.68	810.83(中央)		
	σ_{T2}	-134.42	-347.54	-183.84	-107.22	-75.62(中央)
理論値	$\sigma_{T1}/\sigma_{T2}(\%)$	-17.52	-37.65	-21.92	-12.81	-21.66(中央)
	σ_{T1}/σ_{T2}	836.00	836.00	836.00	836.00	836.00
平面剛節トラス	σ_{T1}/σ_{T2}	1.05	1.00	0.97		
	σ_{T1}	828.80	787.18	799.42		
立体ピン節トラス	σ_{T1}/σ_{T2}	1.06	1.06	1.05		
	σ_{T1}	832.78	832.78	832.78		
平面剛節トラス	σ_{K1}	-2243	-263.01	-267.00	-271.84	-273.9
	σ_{K2}	2.69	31.58	32.06	32.6	32.57
立体ピン節トラス	$\sigma_{K1}/\sigma_{K2}(\%)$	2.69	31.58	32.06	32.6	32.57
	σ_{K1}/σ_{K2}	1.06	1.00	0.97		
平面剛節トラス	σ_{K1}	828.37	788.44	800.95		
	σ_{K2}	-14.19	-247.31	-251.83	-194.1	-267.71
立体ピン節トラス	$\sigma_{K1}/\sigma_{K2}(\%)$	1.71	30.10	33.45	3.73	34.16
	σ_{K1}/σ_{K2}	1.06	1.06	1.01		

(注) $\sigma_{T1}, \sigma_{T2}, \sigma_{K1}, \sigma_{K2}$: 1次応力, $\sigma_{T2}, \sigma_{K2}, \sigma_{K2}$: 2次応力表-7 主構における下弦材の節点たわみ ($P_{max}=10t$, 中央載荷)

種 別	主 構 A			主 構 B		
	節点7	節点11	節点15	節点7'	節点11'	節点15'
理論値	平面剛節トラス	2.625	3.582	2.621	2.629	3.589
	立体ピン節トラス	2.568	3.560	2.563	2.556	3.571
実験値	平面剛節トラス	2.541	3.511	2.536	2.529	3.520
	立体ピン節トラス	2.294	3.185	2.229	2.257	2.972

研究成果の中の一部, すなわち立体剛節トラスの上・下弦材の節点変位および節点回転角の理論計算値を表-1, 2, 3, 4に示し, 上・下弦材の断面応力度と下弦材の節点たわみに関する各種理論値と実験値との比較結果を表-5, 6, 7に示す。なお, 荷重は集中荷重による中央載荷で主構片側当り 1,000 kg, 合計 2,000 kg とする。

5. 結 言

1) 実験値に多少のばらつきはあつたが, その大部分は充分利用出来る値なので, 特に極端な一部の値だけ除き最小自乗法により平均値を求め, 変動係数も求めた結果, 10~40%の範囲に収った。軸力によるひずみに対し, 曲げによるひずみの方が変動の大きいとい傾向が明らかとなつた。

2) 1次応力に関し, 平面ピン節トラス, 平面剛節トラス, 立体ピン節トラス, 立体剛節トラスの4種類の解析結果を比較吟味すると, 平面ピン節トラス > 平面剛節トラス > 立体ピン節トラス > 立体剛節トラスの順となつてゐる。また, 平面ピン節トラスと平面剛節トラスとは比較的近似し, 立体ピン節トラスと立体剛節トラスが比較的近似していることが明かとなつた。また, 2次応力では, 平面剛節トラスの方が立体剛節トラスに比べ, X-Y軸面に対し大きい値を示し, たわみでは, 立体剛節トラス < 立体ピン節トラス < 平面剛節トラスの順となつてゐる。

3) 立体剛節トラス理論による計算値と実験値との比較についていえば, 応力では, 上・下弦材の実験値が理論値よりも最大約 20%ほど大きく出てゐるし, 垂直材・斜材の実験値は理論値よりも約 10%弱小さくなつてゐるし, たわみでは, 一般的に実験値の方が理論値よりも約 10%程度小さい値を示している。また, 2次応力では, 実験値の方が理論値よりも大きくなつてゐるが, 2次応力/1次応力の比率でみると, 理論値・実験値とも殆んど同率であり, 約 30~40%の範囲となつてゐる。この範囲の2次応力は各種のトラスについてすでに計算値の値と比較してみても妥当な比率であらう。

4) 破壊は予想通り上弦材10-12に生じ, 次に斜材10-11に変形が起り, その後下弦材9'-11', 9-11に変形が及んだ。なお, 破壊箇所は2次応力の比較的大きいところとなつてゐることが特別に注目された。

最後に, 本研究にご協力頂いた室蘭工業大学土木工学科志村政雄助平, 昭和50年卒業生谷藤真吾・伊藤正の両君に心から感謝の意を表する次第である。

(文献) 1) 〇中村作太郎・田中功・土居博史: 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集 I-24, 47(1975)。